

高速侧铣淬硬模具钢表面粗糙度

庞俊忠^{1,2}, 王敏杰^{*1}, 段春争¹

(1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 中北大学 机械工程与自动化学院, 山西 太原 030051)

摘要: 使用 12 mm 直径的 TiAlN 涂层的整体硬质合金圆柱立铣刀, 对热处理硬度为 41 HRC 的 3Cr2Mo(AISI P20) 钢进行了高速侧铣试验, 利用表面轮廓仪测量了表面粗糙度. 通过单因素试验结果和正交试验结果分析, 研究了切削速度、每齿进给量和切削宽度对表面粗糙度的影响, 得出影响表面粗糙度的主要因素是每齿进给量和切削速度, 并建立了表面粗糙度试验预测模型. 试验中所使用的切削参数为主轴转速 8 000~20 000 r/min, 每齿进给量 0.025~0.125 mm/tooth, 切削宽度 0.1~0.3 mm.

关键词: 表面粗糙度; 预测模型; 淬硬模具钢; 高速侧铣

中图分类号: TG506.1 **文献标志码:** A

0 引言

高速切削淬硬钢, 作为现代制造业的一种先进加工技术, 得到了越来越广泛的应用, 尤其在模具、航空航天等工业部门, 高速切削技术的应用, 有效地减少了加工时间, 降低了加工成本, 获得了低的表面粗糙度, 减少了抛光工作量^[1].

球刀高速铣削时, 表面粗糙度的研究已有不少报道^[2,3], 但使用圆柱立铣刀, 其相关报道较少. Vivancos 等^[4]使用直径 6 mm 涂层 (Al, Ti, Si)N 的圆柱碳化物超微粒立铣刀, 对硬度 61~62 HRC 的冷作模具钢 K30 进行了高速侧铣加工, 试验切削速度最高 150 m/min. 研究得出: 切削速度和轴向切深的增加减小了粗糙度, 每齿进给量的增加增大了粗糙度. 刘战强等^[5]和王素玉等^[6]研究了涂层刀具高速铣削 45 调质钢 (30~35 HRC) 和 P20 (28 HRC) 的表面粗糙度, 前者研究指出切削速度和每齿进给量在所试验的切削参数范围内对表面粗糙度影响较小, 而后者研究则得出表面粗糙度随每齿进给量的增大而增大, 随切削速度的增大而减小.

综上所述, 每齿进给量的减小有助于降低表面粗糙度, 这一点是得到广泛认同的, 但切削速

度、切削宽度对粗糙度的影响有较大的差别, 这可能是具体高速加工条件的差异所致, 因而, 对于具体高速切削条件, 分析切削参数对表面粗糙度的影响, 建立相应的表面粗糙度预测模型, 以便优选切削参数, 指导生产实践, 显得十分必要. 本文就高速切削 3Cr2Mo 淬硬模具钢 (40~42 HRC) 切削参数对已加工表面粗糙度的影响进行研究, 通过对单因素试验结果和正交试验结果进行分析, 得到对粗糙度影响较大的因素; 进一步地, 通过回归分析, 得到粗糙度和切削速度、每齿进给量的二次函数关系.

1 试验设备和试验条件

高速侧铣试验在日本 OKUMA 公司的 MB56VA-R 三轴高速铣削中心上进行 (机床主轴最高转速 25 000 r/min, 三轴铣削进给速度 32 m/min). 刀具为 TiAlN 涂层的整体圆柱立铣刀 (台湾 OSL 公司产 S300F 和 S400F 型), 几何参数如表 1, 铣刀 01 用于单因素试验, 铣刀 02 用于正交试验. TiAlN 涂层不但硬度高, 摩擦因数小, 高温下导热系数低, 更具有高的热稳定性, 适合高速干切削淬硬钢, 表 2 给出了 TiAlN 涂层的主要

收稿日期: 2007-03-04; 修回日期: 2009-01-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50775018).

作者简介: 庞俊忠 (1963-), 男, 博士生, 副教授, E-mail: pangjunzhong@163.com; 王敏杰* (1958-), 男, 教授, 博士生导师.

物理化学性能.

表1 刀具几何参数

Tab.1 Geometric parameters of the cutter

| 铣刀编号 | D/mm | N/个 | $\lambda/(\circ)$ | $\alpha/(\circ)$ | t/ μm |
|------|------|-----|-------------------|------------------|------------------|
| 01 | 12 | 4 | 45 | 0 | 3 |
| 02 | 12 | 2 | 35 | 0 | 3 |

表2 TiAlN 涂层的主要性能

Tab.2 The important properties of TiAlN coating

| 性能参数 | 参数值 |
|----------------------------|-----------|
| 微观硬度/HV0.05 | 3 300 |
| 干切钢的摩擦因数 | 0.30~0.35 |
| 最大工作温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 900 |
| 压应力/GPa | -1.3/-1.5 |

试件材料为 3Cr2Mo 钢,尺寸 160 mm×110 mm×42 mm,如图 1 所示,主要物理性能参数如表 3 所示,热处理硬度 41 HRC(40~42 HRC). 试验切削条件如表 4,使用日本 SE-3H 表面轮廓仪来测量表面粗糙度,取样长度为 0.8 mm,每面测量 3 线,取其均值.

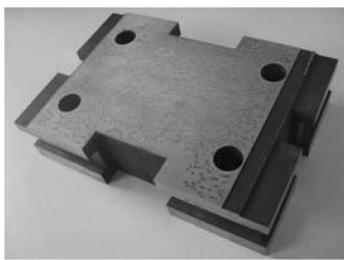


图1 试件

Fig.1 Workpiece

表3 3Cr2Mo 钢的主要物理参数

Tab.3 The physical properties of 3Cr2Mo steel

| 参数 | 参数值 |
|---|---------|
| 密度/($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$) | 7.81 |
| 弹性模量/MPa | 212 000 |
| 热导率/[$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$] | 36.0 |
| 膨胀系数/ 10^{-6}K^{-1} | 11.9 |

表4 试验切削条件

Tab.4 Cutting parameters used in the experiment

| 切削条件 | 参数值 |
|---|--------------|
| 切削速度 $v/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$ | 301~754 |
| 主轴转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ | 8 000~20 000 |
| 每齿进给量 $f_z/(\text{mm} \cdot \text{tooth}^{-1})$ | 0.025~0.125 |
| 进给速度 $v_f/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$ | 800~8 000 |
| 轴向切深 A_d/mm | 12 |
| 切削宽度 R_d/mm | 0.1~0.3 |
| 铣削方式 | 顺铣 |

2 试验设计和结果

2.1 单因素试验及结果

固定轴向切削深度 A_d ,改变其他切削参数进行试验,图 2~图 4 分别给出了切削速度 v 、每齿进给量 f_z 、切削宽度 R_d 对粗糙度的影响曲线,从图中看出,在相对较低的切削速度范围内,粗糙度随切削速度的增加而降低,当达到某一切削速度以后,随着切削速度的进一步增加,粗糙度有所升高;每齿进给量增加,粗糙度基本呈直线增大;切削宽度增加,粗糙度降低,并逐步趋缓;从影响程度来看,每齿进给量最大,切削速度次之,切削宽度最小.

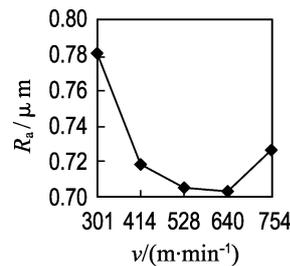


图2 表面粗糙度与切削速度

Fig.2 Surface roughness vs. cutting speed

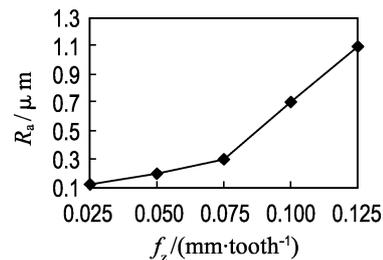


图3 表面粗糙度与每齿进给量

Fig.3 Surface roughness vs. feed rate

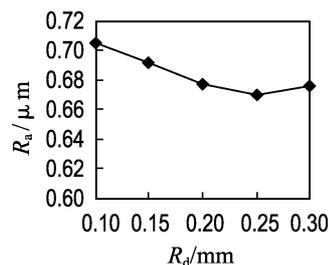


图4 表面粗糙度与切削宽度

Fig.4 Surface roughness vs. radial depth of cut

2.2 正交试验及结果

固定轴向切削深度,选择切削速度、每齿进给量、切削宽度作为试验因子,分别标识为 I、II、III;每个因子取其 3 个水平 1、2、3,从而得到一个 3 因素、3 水平的正交试验表 $L_9(3^4)$,正交表第 4 列为空列,标识为 IV.表 5 是所设计的正交试验表

以及在相应试验中所获得的表面粗糙度 R_a ,表中各面进行了2次加工,粗糙度试验值较低,在 $0.057\sim 0.217\ \mu\text{m}$.和常规切削加工相比,高速切削淬硬模具钢取得了明显低的粗糙度,主要是由于高的切削速度,抑制了低、中切削速度切削时所产生的积屑瘤和鳞刺,减少了已加工表面的塑性变形;其二,高的切削速度和工件材料硬度,增大了剪切角,使得切屑变形减小;其三,高的切削速度,使得第三变形区单位时间内摩擦热剧增,有效地降低了摩擦因数,减少了已加工表面的塑性变形;其四,高速切削淬硬钢,切削力反而会低,而切削力正是切削过程中产生振动的主要激励源,高的转速使切削系统的工作频率远离机床的低阶固有频率,而工件的表面粗糙度对低阶固有频率最敏感。

表5 试验设计正交表及其试验结果

Tab.5 Experimental design matrix and results

| 序号 | v | I | f_z | II | R_d | III | IV | R_a |
|----|-----|---|-------|----|-------|-----|----|-------|
| 1 | 301 | 1 | 0.050 | 1 | 0.1 | 1 | 1 | 0.110 |
| 2 | 301 | 1 | 0.075 | 2 | 0.2 | 2 | 2 | 0.145 |
| 3 | 301 | 1 | 0.100 | 3 | 0.3 | 3 | 3 | 0.217 |
| 4 | 490 | 2 | 0.050 | 1 | 0.2 | 2 | 3 | 0.065 |
| 5 | 490 | 2 | 0.075 | 2 | 0.3 | 3 | 1 | 0.101 |
| 6 | 490 | 2 | 0.100 | 3 | 0.1 | 1 | 2 | 0.191 |
| 7 | 754 | 3 | 0.050 | 1 | 0.3 | 3 | 2 | 0.057 |
| 8 | 754 | 3 | 0.075 | 2 | 0.1 | 1 | 3 | 0.122 |
| 9 | 754 | 3 | 0.100 | 3 | 0.2 | 2 | 1 | 0.190 |

3 试验结果分析

3.1 单因素试验结果分析

每齿进给量的增加,使得粗糙度直线上升,可

从公式 $h_{\max} = f_z^2/8r$ 看出, h_{\max} 为理论最大残留高度, r 为刀具半径;在相对较低的切削速度范围内,随着切削速度的增加,第三变形区的挤压及弹性变形减小,从而降低了表面粗糙度,这种降低趋势随着速度的提高而变缓,当切削速度超过一定限度,随着切削速度的进一步增加,由于振动的作用,粗糙度会有所升高;切削宽度的增加,使粗糙度有所降低,但影响作用较小。

3.2 正交试验结果分析

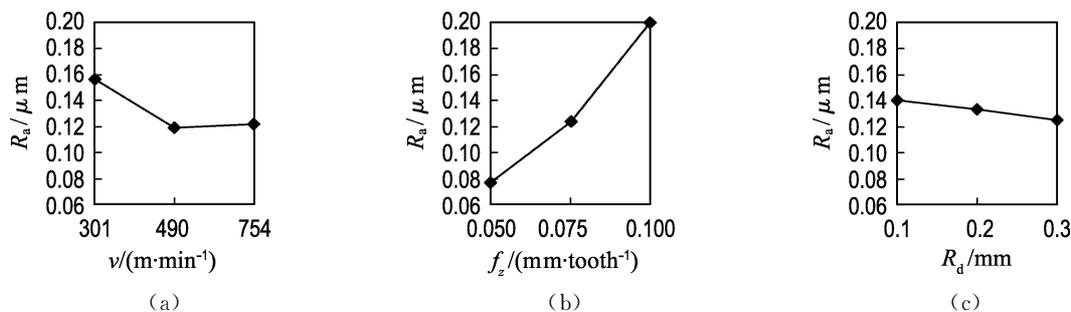
正交试验结果的分析,主要有直观分析法、方差分析法和贡献率分析法.直观分析法简便、有效,但不能回答哪些因子对试验指标有显著影响;方差分析法相对来讲数据处理复杂,但更加科学,恰好克服了直观分析法的缺点,但它要求试验指标服从正态分布;贡献率分析法是通过比较因子的“贡献率”来衡量因子作用的大小,对试验指标是否服从正态分布并不要求。

为了直观考察各切削参数对表面粗糙度的影响程度,使用直观分析^[7]对数据进行处理,得出正交试验结果直观分析表6.表中给出了所考察影响因子在各水平下的表面粗糙度 R_a 的均值及水平极差 ρ .从表中知,每齿进给量的水平极差最大,切削速度次之,切削宽度最小,即每齿进给量对粗糙度的影响最大,切削速度影响次之,切削宽度影响最小.图5为各影响因子的水平与粗糙度均值的变化图,从图上知,粗糙度随切削速度的增加呈现先减小、后稍有增大的趋势;每齿进给量的

表6 正交试验结果直观分析

Tab.6 Intuitive analysis of the results for the design of experiments

| | v | | | f_z | | | R_d | | |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| R_a | 0.157 | 0.119 | 0.123 | 0.077 | 0.123 | 0.199 | 0.141 | 0.133 | 0.125 |
| ρ | 0.038 | | | 0.122 | | | 0.016 | | |

图5 粗糙度 R_a 随影响因子的水平变化图Fig.5 Main effects plot for workpiece surface roughness, R_a

增加导致粗糙度直线上升,而且上升速度越来越快;切削宽度的增加,导致粗糙度减小,但减小速度较慢,变化量相对不大.这和单因素试验所得到的结果是相吻合的.

表7给出了方差分析的结果, D_f 为自由度, S 为误差平方和, MS 为均方差, η 为贡献率, S_e 为残差, S_t 为总误差.

据 F 分布表^[7], $F_{0.01}(2,2) = 99, F_{0.05}(2,2) = 19, F_{0.1}(2,2) = 9$, 从表中, $F_{f_z} > F_v > F_{0.01}(2,2)$, 每齿进给量和切削速度的影响高度显著.

$F_{0.05}(2,2) > F_{R_d} > F_{0.1}(2,2)$, 切削宽度有一定影响. 贡献率的分析也证明了这一点, 对因子 I 的贡献率 $\eta = (S_I - D_{f_1} \cdot MS_e) / S_t$, 其他因子的贡献率依此类推. 每齿进给量对 R_a 的贡献率达到 88.06%, 其次是切削速度的贡献率达到 10.21%, 切削宽度贡献率较小, 只有 1.4%, 同时也反映出误差较小, 仅占 0.33%, 说明其他影响因子较小.

表7 R_a 方差分析结果

Tab. 7 Analysis of variance results for R_a

| 因子 | D_f | S | MS | F | $\eta/\%$ |
|-------|-------|-----------------------|-----------------------|----------|-----------|
| v | 2 | 0.002 664 | 0.001 332 | 123.33 | 10.21 |
| f_z | 2 | 0.022 817 | 0.011 408 | 1 056.30 | 88.06 |
| R_d | 2 | 0.000 384 | 0.000 192 | 17.78 | 1.40 |
| S_e | 2 | 2.16×10^{-5} | 1.08×10^{-5} | | 0.33 |
| S_t | 8 | 0.025 887 | 0.003 236 | | 100 |

3.3 粗糙度试验预测模型

由上面的分析可知, 切削速度的影响不是线性关系, 而每齿进给量和切削宽度的影响近似线性关系, 因而有理由假设粗糙度是 v 的二次和 f_z 、 R_d 的一次关系式, 有下式:

$$R_a = C_0 + C_v v + C_{f_z} f_z + C_{R_d} R_d + C_w v^2 \quad (1)$$

问题的关键就是求取回归系数 C_0 、 C_v 、 C_{f_z} 、 C_{R_d} 、 C_w , 并对回归方程拟合的好坏进行显著性检验. 设

$$\hat{y} = R_a, \quad b_0 = C_0, \quad b_1 = C_v, \quad b_2 = C_{f_z},$$

$$b_3 = C_{R_d}, \quad b_4 = C_w$$

$$x_1 = v, \quad x_2 = f_z, \quad x_3 = R_d, \quad x_4 = v^2$$

等式(1)变换成多元线性方程(2)的形式:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 \quad (2)$$

假设控制变量个数为 m , 试验次数为 n , 多元线性回归方程可写成如下的一般形式^[8]:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_m x_{im} + \epsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

其中 ϵ_i 为试验随机变量误差.

写成矩阵形式:

$$Y = X\beta + V \quad (4)$$

式中

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{pmatrix},$$

$$\beta = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_m \end{pmatrix}, \quad V = \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{pmatrix}$$

设 $b = (b_0 \quad b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_m)^T$ 是回归参数 $\beta = (\beta_0 \quad \beta_1 \quad \beta_2 \quad \dots \quad \beta_m)^T$ 的最小二乘估计, 回归方程可写成

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + \dots + b_m x_{im} \quad (5)$$

有回归系数

$$b = (X^T X)^{-1} (X^T Y) \quad (6)$$

检验回归方程(5)的显著性, 假设 $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_m = 0$. 根据回归方差与残差方差计算统计量 F 值, 利用 F 表选取置信水平找出临界值进行比较和判断. 当 $F > F_\alpha(m, n - m - 1)$ 时, 在 $100(1 - \alpha)\%$ 的置信度下断定, 假设前提不成立, 则回归方程显著; 反之, 回归方程不显著.

回归方程显著并不意味着每一个自变量 x 都对因变量 y 有同等的影响, 为了简化方程, 从方程中剔除那些次要和无关的自变量, 回归系数的检验也是必要的. 假设 $H_0: \beta_j = 0$. 据 $E(b_j) = \beta_j$, $D(b_j) = c_{jj} \sigma^2$, c_{jj} 为相关矩阵 $C = (X^T X)^{-1}$ 中对角线上第 j 个元素^[8], 于是有

$$(b_j - \beta_j) / \sqrt{c_{jj} \sigma^2} \sim N(0, 1)$$

由于假设 $\beta_j = 0$, 有统计量

$$F = \frac{b_j^2 / c_{jj}}{S_e / (n - m - 1)} \quad \text{或} \quad t = \frac{b_j}{\sqrt{c_{jj} S_e / (n - m - 1)}}$$

以此来检验回归系数是否显著^[7,8].

据上述理论, 应用微软公司电子表格 (Microsoft Excel 2003) 提供的数据分析工具, 对粗糙度模型(2)进行回归, 取 $m = 4, n = 9$, 得到回归系数 b 、相应回归方程方差分析表 8、回归系

数的显著性分析表 9 以及相关系数 $R = 0.990 0$.

$$b_0 = 0.122 363, b_1 = -0.035 007,$$

$$b_2 = 2.44, b_3 = -0.08, b_4 = 0.001 732$$

由此得到回归方程

$$R_a = 0.122 363 - 0.035 007v + 2.44f_z - 0.08R_d + 0.001 732 v^2 \quad (7)$$

表 8 R_a 回归方程的方差分析 ($m=4, n=9$)

Tab. 8 Analysis of variance results for the regression equation of R_a ($m=4, n=9$)

| | D_f | S | MS | F |
|-------|-------|-----------|-----------|-------|
| S_r | 4 | 0.025 374 | 0.006 344 | 49.56 |
| S_e | 4 | 0.000 513 | 0.000 128 | |
| S_t | 8 | 0.025 887 | | |

表 9 R_a 模型回归系数的显著性分析 ($m=4, n=9$)

Tab. 9 Significance analysis for the regression coefficients of R_a model ($m=4, n=9$)

| b_j | s | t |
|-------|-----------|-------|
| b_1 | 0.010 391 | -3.37 |
| b_2 | 0.184 872 | 13.20 |
| b_3 | 0.046 218 | -1.73 |
| b_4 | 0.000 580 | 2.99 |

表 8 中, S_r 为回归误差; 表 9 中, $s = \sqrt{c_{jj} S_e / (n - m - 1)}$.

回归方程显著性检验: 据 F 分布表^[7], $F_{0.01}(4, 4) = 15.98$, 由表 8, $F > F_{0.01}(4, 4)$, 回归方程高度显著.

回归系数显著性检验: 据 t 分布表^[7], $t_{0.01/2} = 4.6$, $t_{0.05/2} = 2.78$, $t_{0.1/2} = 2.13$, 由表 9, $|t_2| > t_{0.01/2}$, 系数 b_2 影响高度显著; $t_{0.01/2} > |t_1| > |t_4| > t_{0.05/2}$, 系数 b_1 和 b_4 影响显著; $|t_3| < t_{0.1/2}$, b_3 影响不大.

因此剔除自变量 x_3 , 重新回归方程, 这时控制变量个数 $m = 3, n$ 仍为 9, 得到新的回归系数、相应回归方程方差分析表 10、回归系数的显著性分析表 11 以及相关系数 $R = 0.982 5$.

$$b_0 = 0.106 363, b_1 = -0.035 007,$$

$$b_2 = 2.44, b_3 = 0.001 732$$

由此得到新的回归方程

$$R_a = 0.106 363 - 0.035 007v + 2.44f_z + 0.001 732v^2 \quad (8)$$

回归方程显著性检验: 据 F 分布表^[7],

$F_{0.01}(3, 5) = 12.06$, 由表 10, $F > F_{0.01}(3, 5)$, 回归方程高度显著.

回归系数显著性检验: 据 t 分布表^[7], $t_{0.01/2} = 4.03$, $t_{0.05/2} = 2.57$, $t_{0.1/2} = 2.02$, 由表 11, $|t_2| > t_{0.01/2}$, 系数 b_2 影响高度显著; $t_{0.01/2} > |t_1| > t_{0.05/2}$, b_1 影响显著; $t_{0.05/2} > |t_3| > t_{0.1/2}$, b_3 有一定影响.

表 10 R_a 回归方程的方差分析 ($m=3, n=9$)

Tab. 10 Analysis of variance results for the regression equation of R_a ($m=3, n=9$)

| | D_f | S | MS | F |
|-------|-------|-----------|-----------|-------|
| S_r | 3 | 0.024 990 | 0.008 330 | 46.54 |
| S_e | 5 | 0.000 897 | 0.000 179 | |
| S_t | 8 | 0.025 887 | | |

表 11 R_a 模型回归系数的显著性分析 ($m=3, n=9$)

Tab. 11 Significance analysis for the regression coefficients of R_a model ($m=3, n=9$)

| b_j | s | t |
|-------|-----------|-------|
| b_1 | 0.012 291 | -2.85 |
| b_2 | 0.218 683 | 11.16 |
| b_3 | 0.000 686 | 2.52 |

至此, 回归方程(8)被认为是最终的、最为简化的回归方程, 把回归方程以图形表示出来, 则可以更加直观地显现出切削速度和每齿进给量对表面粗糙度的影响, 如图 6 所示.

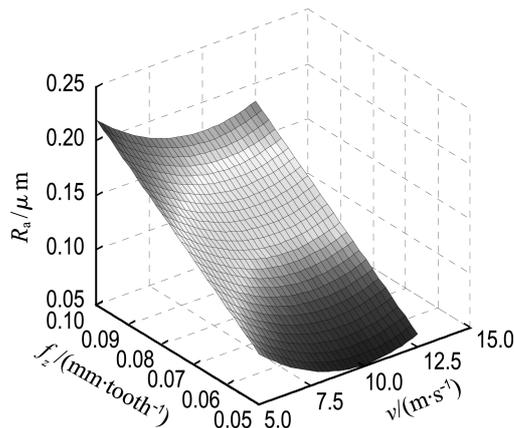


图 6 切削速度 v 、每齿进给量 f_z 与粗糙度 R_a

Fig. 6 Cutting speed v and feed rate f_z vs. R_a

4 结 论

(1) 通过正交切削试验, 高速侧铣 3Cr2Mo 淬

硬模具钢, 获得了较低的表面粗糙度, 粗糙度 R_a 在 $0.057 \sim 0.217 \mu\text{m}$, 并给出了试验预测模型。

(2) 每齿进给量对 R_a 的影响最大, 切削速度次之, 切削宽度可以忽略不计, 且 R_a 随切削速度增加呈现出先减小后缓慢增加的趋势, 随每齿进给量的增加而快速增大, 因此, 高速侧铣加工, 为保证低的表面粗糙度, 应采用小的每齿进给量和较高的切削速度。

参考文献:

- [1] ALTAN T, LILLY B, YEN Y C. Manufacturing of dies and molds [J]. *Annals of the CIRP*, 2001, **50**(2):57-62
- [2] VIVANCOS J, LUIS C J, COSTA L, *et al.* Optimal machining parameters selection in high speed milling of hardened steels for injection moulds [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, **155-156**(11): 1505-1512
- [3] ELBESTAWI M A, CHEN L, BECZE C E, *et al.* High-speed milling of dies and molds in their hardened state [J]. *Annals of the CIRP*, 1997, **46**(1):57-62
- [4] VIVANCOS J, LUIS C J, ORTIZ J A, *et al.* Analysis of factors affecting the high-speed side milling of hardened die steels [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, **162-163**(5): 696-701
- [5] 刘战强, 万熠, 艾兴. 高速铣削过程中表面粗糙度变化规律的试验研究 [J]. 现代制造工程, 2002(12):10-11
- [6] 王素玉, 艾兴, 赵军, 等. 高速铣削表面粗糙度建模与预报 [J]. 制造技术与机床, 2006(8):65-68
- [7] 郑少华, 姜奉化. 试验设计与数据处理 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004
- [8] 沈邦兴, 文昌俊. 实验设计及工程应用 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2005

Surface roughness in high-speed side milling of hardened mold steel

PANG Jun-zhong^{1,2}, WANG Min-jie^{*1}, DUAN Chun-zheng¹

(1. Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Using 12 mm diameter solid carbide straight end mills with TiAlN coating, a 3Cr2Mo (AISI P20) steel at 41 HRC was machined at high cutting speed. The workpiece surface roughness was measured with a surface roughness tester. The effects of cutting speed, feed rate and radial depth of cut on the surface roughness were investigated by analysis of orthogonal experiment and single factor analysis. The results show that feed rate and cutting speed are most sensitive to surface roughness. Furthermore, the mathematical model for the surface roughness in high-speed side milling of hardened 3Cr2Mo steel is proposed. The cutting parameters tested are: spindle speeds in the range of 8 000 to 20 000 r/min, feed rate variation from 0.025 to 0.125 mm/tooth, and radial depth of cut from 0.1 to 0.3 mm.

Key words: surface roughness; forecast model; hardened mold steel; high-speed side milling